

LA INFLUENCIA DE LA RESOLUCIÓN HORIZONTAL EN PROBLEMAS RELACIONADOS CON LA OROGRAFÍA

J. A. García-Moya
B. Albarrán
E. Rodríguez
I. Martínez
R. Díaz-Pabón

(Servicio de Predicción Numérica)

RESUMEN

El objetivo del trabajo es estudiar la influencia de la resolución horizontal del LAM en la simulación de estructuras mesoescalares, en particular las que tienen relación con los efectos de la orografía sobre el flujo a escala sinóptica. La verificación se ha hecho usando los datos del experimento PYREX que tuvo lugar en octubre y noviembre de 1992.

1. Introducción.

El efecto de las cadenas montañosas sobre el flujo atmosférico es uno de los temas clásicos que estudia la meteorología.

En los años cincuenta se publicaron algunos estudios que trataban de explicar los hechos observacionales que se habían establecido sobre los efectos de las montañas en el flujo a escala sinóptica, principalmente sobre la llamada **ciclogénesis a sotavento de las cadenas montañosas**, tanto desde el punto de vista estadístico (Klein, 1957; Reitan, 1974; Radinovic, 1965 b) como desde el punto de vista conceptual (Newton, 1956; Pettersen, 1956; Egger, 1974). Estos estudios han establecido los hechos principales de este tipo de ciclogénesis, tanto a sotavento de los Alpes (Radinovic, 1965 a, b; Speranza, 1975;

Egger, 1972; Buzzi y Tibaldi, 1977; etc.), como de las demás grandes cadenas montañosas del planeta (Montañas Rocosas, Andes, etc.), llegando a establecer que cualquier flujo troposférico perpendicular a una cadena montañosa da lugar a una baja a sotavento y una alta a barlovento. La intensidad y la escala espacial de ambas está relacionada principalmente con la dirección y la fuerza del flujo atmosférico respecto de la cadena, la altura y extensión de ésta y las características termodinámicas del flujo (temperatura, etc.).

Además de este efecto, las cadenas montañosas producen una desviación del flujo general en niveles bajos que da lugar a sistemas de viento fuerte que son bien conocidos en las zonas alrededor de dichas cordilleras (cierzo, mistral, tramontana, bora, foehn, etc.). Lógicamente, el efecto es mucho mayor cuando dos cordilleras se

encuentran próximas (como en el caso de los Alpes y los Pirineos, o el Atlas y la Penibética), entonces el acanalamiento del flujo entre ambas hace que los vientos en niveles bajos se vean fuertemente acelerados.

En el caso particular del Mediterráneo, a partir de la publicación clásica de *Reiter (1975)* en la que se establecen los principales hechos observacionales de los efectos de las cadenas montañosas sobre la meteorología del Mediterráneo y de algunos estudios posteriores de aproximación a otras ciclogénesis mediterráneas no alpinas (*Jansá, 1975; Genovés y Jansá, 1987*), se llegó a la conclusión de que era necesario disponer de una base de datos fiable y completa para poder acometer estudios a mesoescala.

Por estas razones el Servicio Meteorológico de Francia (Meteo France) proyectó en 1985 un experimento de campo llamado **PYREX** sobre el efecto de los Pirineos en el flujo atmosférico (*Bougeault y otros, 1990*). Las características de este experimento en el que ha participado el INM pueden encontrarse en las referencias.

La fase de campo se realizó en octubre y noviembre de 1990 y durante ella hubo **10 Períodos de Observación Intensiva (POI)**, tanto en situaciones en las que el flujo era de componente Norte como con flujo de componente Sur. Durante estos períodos se ponía en marcha una serie de sistemas de observación especial que se habían diseñado previamente. Había una red especial de radiosondeos que realizaban medidas cada 6 horas, una red de estaciones automáticas colocada en una línea transversal a los Pirineos (cerca del meridiano de Greenwich), globos de nivel constante que se lanzaban desde el Cabo de Creus y desde el Pico de Midi (que realizaban medidas igual que un radiosonda pero mientras viajan con el viento a un nivel de presión constante) y vuelos de los cuatro aviones que participaban en el experimento (una *Piper Aztec*, un *Merlín* y un *Focke Arat* de Meteo France y un *Falcon* del DLR de Alemania).

2. El sistema de vientos mistral-tramontana-cierzo.

Hemos agrupado estos tres vientos (distintos en dirección, fuerza y región de influencia) en un solo sistema debido a que se originan con la misma situación sinóptica.

Cuando un flujo de aire, relativamente frío, en la troposfera se dirige contra las cadenas

montañosas que limitan la parte Norte del Mediterráneo Occidental (Alpes, Pirineos y Macizo Central francés) soplando desde el N o el NW se suelen originar, con mayor o menor intensidad, ciclogénesis a sotavento de las dos cadenas montañosas (Alpes y Pirineos). Las más intensas son las que, a sotavento de los Alpes, se colocan en el Golfo de Génova.

El efecto combinado de la baja de Génova y de la cuña anticiclónica que, en estos casos, suele colocarse al Oeste o Noroeste de la Península Ibérica acelera el flujo general.

Las perturbaciones sobre este flujo acelerado que producen las cadenas montañosas dan lugar a una nueva intensificación de los vientos en las capas bajas y a una modificación de su dirección de acuerdo con la dirección de las cordilleras. Es así como se originan los vientos citados (*Riosalido y otros, 1985; Jansá, 1987*).

3. Observaciones PYREX del sistema de viento mistral-tramontana-cierzo.

Durante el POI núm. 9 la situación sinóptica era de flujo de Norte sobre los Pirineos con un ángulo de incidencia de unos 45 grados en todo el espesor de la troposfera.

Este flujo se encuentra dirigido, a escala sinóptica, por el Anticiclón de las Azores localizado al W de la Península Ibérica y una baja centrada sobre Libia. En niveles altos (300 hPa) se observa un chorro de NW de unos 75 Kt incidiendo directamente sobre la cadena.

Se observaron entonces valores de la tramontana de unos 60 Kt a unos 960 hPa y con un giro de viento hacia la componente Norte al pasar del día 15 al 16. Esto fue debido al desarrollo de una intensa borrasca en la zona del Golfo de Génova (a sotavento de los Alpes) durante el día 15, la borrasca se movió hacia la Isla de Córcega el día 16, produciendo una perturbación en el flujo en el Golfo de León que hizo girar el viento hacia el Norte primero y después al NNE.

4. Características de las versiones del LAM usadas en los experimentos.

Para este estudio hemos utilizado **tres resoluciones** horizontales distintas, pero manteniendo la misma resolución vertical (10 niveles P para el análisis y 15 niveles para la predicción). Ésta

es una primera limitación que tenemos, ya que para las resoluciones horizontales usadas la resolución vertical es claramente insuficiente (tendríamos que tener, por lo menos, 30 niveles en la vertical), sin embargo, puesto que nuestro interés está en los niveles bajos donde se agrupan la mayoría de los 15 niveles del modelo, los resultados no se alterarán significativamente.

Las versiones utilizadas en este estudio mantienen el mismo número de puntos de rejilla que la versión operativa (4.900 puntos), por lo tanto el área tiene que reducirse. Las características de estas versiones son las expuestas en la tabla I:

Tabla I

Nombre	Resolución horiz.		Área	Δt (s)
	(°latxlon) -	(km)		
LAM0.910	0,910 -	100x60	21,00N-65,69N 60,00W-28,27E	450
LAM0.455	0,455 -	50x30	28,73N-51,03N 15,86W-28,27E	225
LAM0.166	0,166 -	20x12	37,84N-46,00N 08,20W-07,96E	120

La versión que llamaremos **LAM0.910** es la versión operativa del modelo, que se corre varias veces al día desde finales de 1985, obteniendo predicciones hasta 48 horas.

La versión que llamaremos **LAM0.455** es una versión a doble resolución que se corre experimentalmente para obtener predicciones también hasta 48 horas.

La versión que llamaremos **LAM0.166** tiene una resolución horizontal de 10' de grado exactamente y se utiliza solamente para la adaptación de los campos previstos por la versión LAM0.455 a la nueva orografía de esta versión. Es decir, que las condiciones de contorno se mantienen constantes durante la integración (e iguales a las condiciones iniciales) y se usa sólo la integración temporal del modelo para obtener la convergencia en la adaptación de los campos de la versión LAM0.455. Con esta versión se hacen integraciones hasta 6 horas.

Puesto que los datos de **orografía** se obtienen para cada versión a partir de los datos de

la **cinta de la Navy** (cuya resolución es de 10' de grado) la principal diferencia entre las distintas versiones utilizadas es dicha orografía, tanto en la distribución de las cordilleras como en las alturas máximas que se alcanzan en cada una de ellas. En la Figura 1 pueden verse las orografías correspondientes a cada versión en el área de estudio (a, b y c).

Finalmente, en la Figura 1.d podemos observar los perfiles orográficos en la línea de las estaciones automáticas francesas que atraviesa los Pirineos. Al aumentar la resolución horizontal obtenemos un estrechamiento de la cadena y un aumento de la altura máxima y de las pendientes a ambos lados de la cordillera (compárese con el perfil real de las alturas de las estaciones que es la curva 4).

Estas diferencias son las que nos van a marcar, principalmente, las diferencias en los resultados obtenidos en los campos de viento de los niveles bajos de la troposfera.

La primera de las dos integraciones se ha hecho partiendo del análisis a 0,910 del día 14 de noviembre a las 12 UTC (interpolado a 0,455 para la del LAM0.455) y la segunda partiendo de las condiciones del día 15 a las 00 UTC. En este último caso se han hecho los análisis a las mismas resoluciones de las dos versiones del modelo.

5. Resultados de las integraciones. Comparación con las observaciones PYREX.

En las Figuras 2 y 3 tenemos los resultados de las dos versiones del modelo para el día 15 a las 12 UTC. La situación sobre los Pirineos parece haberse debilitado un poco. El represamiento de aire frío a barlovento de la cordillera es algo más débil que el día anterior.

Comparando con las observaciones (Figura 5.a para superficie y 5.b para el vuelo de la *Piper* de ese día) se sigue observando una mejoría de la versión de alta resolución con vientos más fuertes tanto en el Golfo de León como en el Valle del Ebro. La tramontana de Menorca sigue estando sobrestimada por las dos versiones.

En el caso del cierzo, éste ocupa, en ambas versiones del modelo, un área del Valle del Ebro mucho mayor de la que se deduce de los datos de superficie, esto puede ser debido a que no se representan bien los hechos orográficos de pequeña escala presentes en el valle.

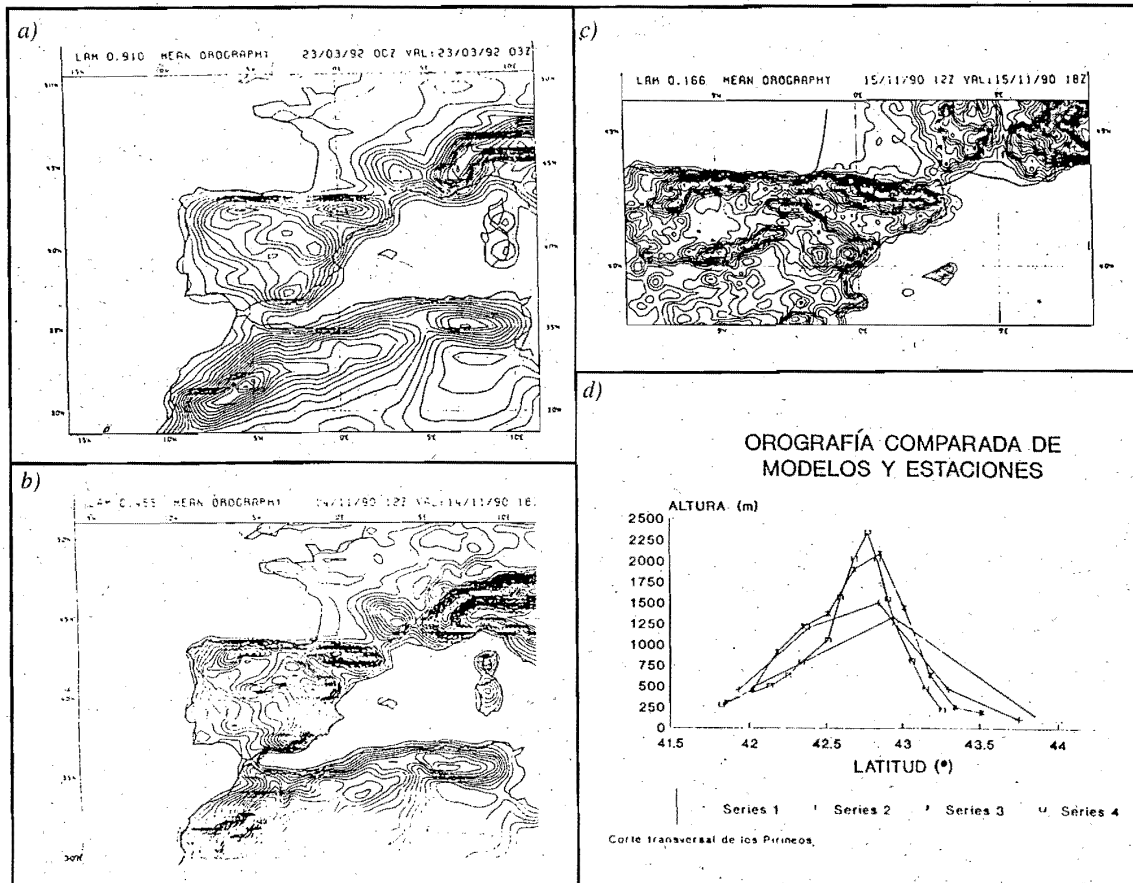


Figura 1.- Orografías de las tres versiones del LAM usadas: a) LAM0.910, b) LAM0.455, c) LAM0.166 y d) perfiles orográficos de las tres versiones del LAM en la línea de las estaciones automáticas que atraviesa los Pirineos (1- LAM0.910; 2- LAM0.455; 3- LAM0.166; y 4- estaciones automáticas)

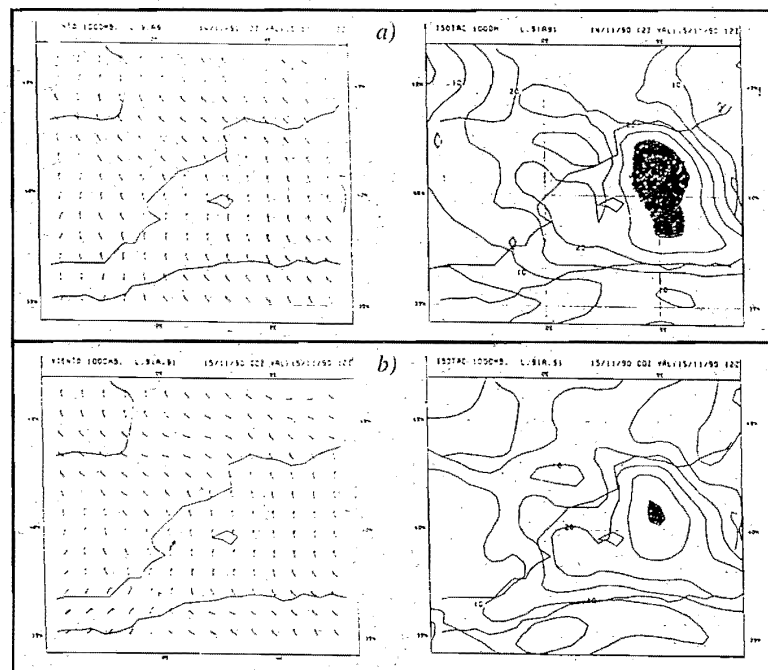


Figura 2.- Salida de la versión LAM0.910 para el día 15 de noviembre a las 12 UTC, viento a 1.000 hPa y módulo del mismo en Kt (sombreadas las zonas con vientos superiores a 30 Kt). a) Integración del día 14 a las 12 UTC y b) integración del día 15 a las 00 UTC

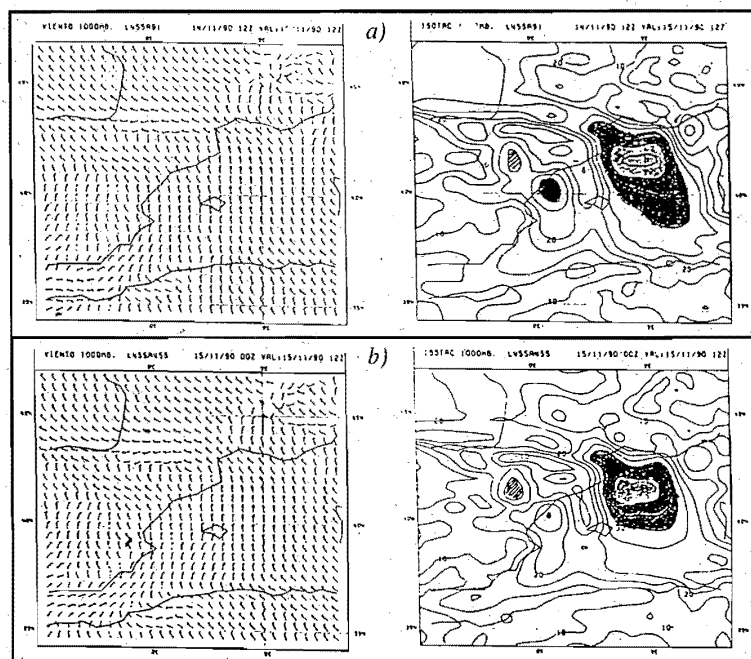


Figura 3.- Igual que la Fig. 2 pero para la versión LAM0.455 (el sombreado débil es para vientos de más de 40 Kt)

Para la zona del Golfo de León, ambas versiones subestiman la tramontana y desplazan el máximo corriente abajo, sin embargo, los valores obtenidos por la versión de alta resolución son bastante mejores que los de baja.

La línea de cizalladura de la tramontana está mucho mejor representada, en posición y anchura, por la versión de alta resolución, sin embargo, aún en esta versión se encuentra desplazada hacia el W y es más ancha de lo que se deduce de los datos del avión. Asimismo, el acoplamiento entre el cierzo y la tramontana en la costa catalana está mal representado en ambas versiones.

Las dos versiones sobrestiman el viento en Menorca debido a que en ellas la tramontana alcanza antes la isla de lo que lo hace en realidad. Sin embargo, una vez que el viento en Menorca aumenta (el día 16 a las 06 UTC, no mostrado aquí) los valores de la versión de alta resolución son también mejores que los de baja.

Como resumen de esta comparación podemos afirmar que en el caso del cierzo, el LAM0.910 subestima la velocidad y da una mala representación de la dirección, mientras que el LAM0.455 da una adecuada representación de la dirección y se aproxima mucho a los valores de velocidad medidos.

En la Figura 4 se representan las salidas de la adaptación a 3 horas de los campos del día 15

de noviembre a las 12 UTC. Comparando estos campos con los de la Figura 3 resultado de la integración de la versión LAM0.455 podemos observar una mejora general en las velocidades y direcciones de los vientos fuertes, con un máximo de 40 Kt cerca de la costa de Francia y otro desplazado corriente abajo.

La mejora más notable se obtiene en la representación de la línea de cizalladura, que en esta versión está mejor localizada y es más estrecha que en el LAM0.455.

En cuanto al cierzo, aparecen chorros más intensos cerca de los Pirineos, junto con circulaciones más débiles cerca de las bajas de sotavento. El chorro general por el centro del valle es, más o menos, de la misma intensidad que el resultante de la versión LAM0.455. Hay que notar también que debido a la representación deficiente de la orografía de la provincia de Barcelona (tomada de manera continua en la resolución 0,166) se produce un nuevo estrechamiento de la salida del Valle del Ebro que da lugar a un nuevo máximo de cierzo en la costa de Tarragona que no parece corresponderse con la realidad.

También se observa una mejora notable en la representación de los vientos débiles al otro lado de la línea de cizalladura, con vientos de componente Oeste en la costa de Barcelona (compárese con las medidas de la Piper, en la Figura 5b).

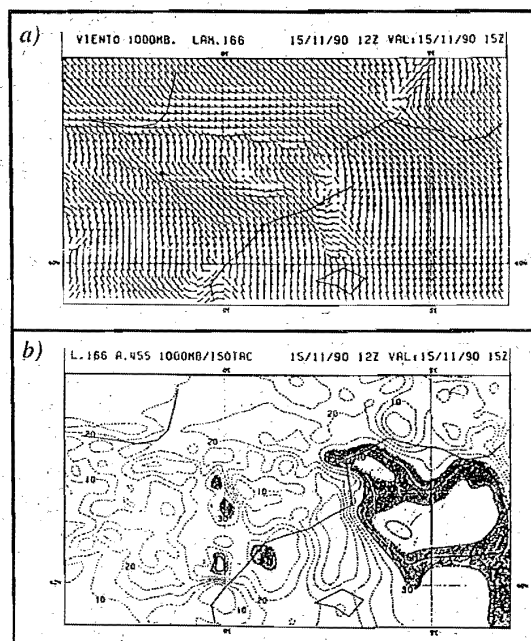


Figura 4.- Adaptación con la versión LAM0.166 de los campos de la versión LAM0.455 para el día 15 a las 12 UTC, viento en 1.000 hPa y módulo del mismo (3h de integración para la adaptación)

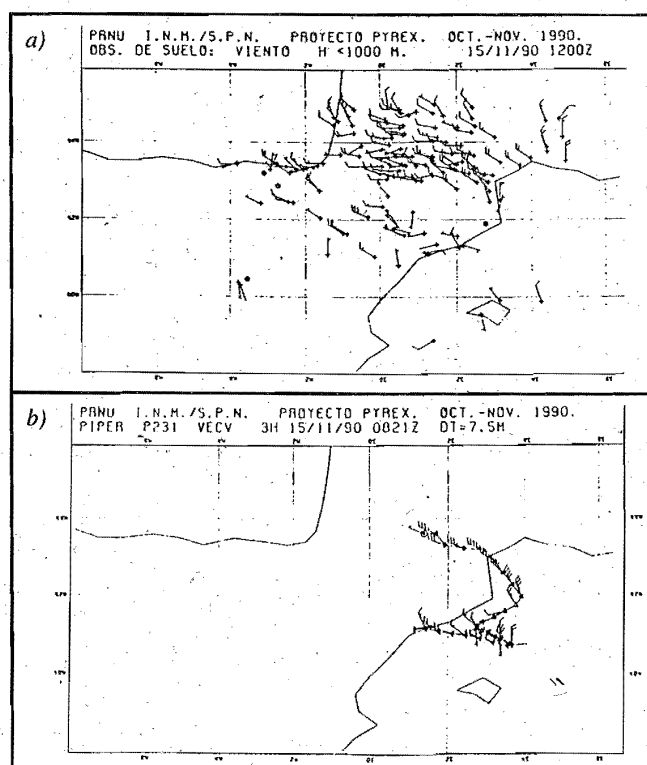


Figura 5.- a) Observaciones de superficie en el día 15/11/90 a las 12,00Z. b) Observaciones tomadas del vuelo del avión 'Piper Aztec P231' del día 15/11/90 a las 08,21Z cada 7,5 minutos

Como consecuencia de todo esto podemos afirmar que la utilidad principal de la versión LAM0.166 en modo de adaptación de los campos previstos por el LAM0.455, estriba en la utilidad que puedan tener en zonas de España en las que se produzcan vientos fuertes debidos a estructuras de mesoescala que no están bien resueltas por las versiones del LAM de mayor resolución horizontal, como por ejemplo, el Mediterráneo Occidental, el Estrecho de Gibraltar, etc. Además se podrían preparar versiones simplificadas de este modelo (con menos niveles verticales concentrados en las capas bajas y algunas parametrizaciones menos) que se usaran operativamente en los G.P.V. a partir de las salidas del LAM y que se ejecutaran en los propios ordenadores de los C.M.T. (por ejemplo, en los Fujitsu S-1600 adquiridos recientemente por el INM).

6. Comparación de los globos de nivel constante con las trayectorias deducidas de las integraciones.

Otra de las comparaciones que se pueden hacer con las salidas del modelo es calcular las trayectorias teóricas de una burbuja de aire, a una presión fija, que se moviera con el viento previsto por el modelo a partir de un instante de tiempo fijado. Estas trayectorias y los vientos usados

para calcularlas pueden compararse con las trayectorias de los globos a nivel constante y los vientos deducidos a partir de ellas.

De la comparación de todas las trayectorias (Figuras 6 y 7) podemos deducir que la versión de alta resolución mejora tanto la dirección como la velocidad de los vientos, pero aún se encuentra lejos de los valores deducidos de las trayectorias de los globos. Lógicamente, la mejora se debe principalmente a que la versión LAM0.455 tiene una mejor representación de la orografía.

Conclusiones.

- El aumento de la resolución horizontal se traduce en una **mejora en la representación de la orografía**, tanto en las alturas máximas de las cordilleras como en la extensión y anchura de las mismas.
- Esto hace que las **estructuras** que tienen que ver directamente con los hechos orográficos estén **mejor representadas** en las versiones de mayor resolución.
- Al pasar del LAM0.910 al LAM0.455 obtenemos un aumento de, aproximadamente, el 30% en los máximos de viento considerados (cierzo,

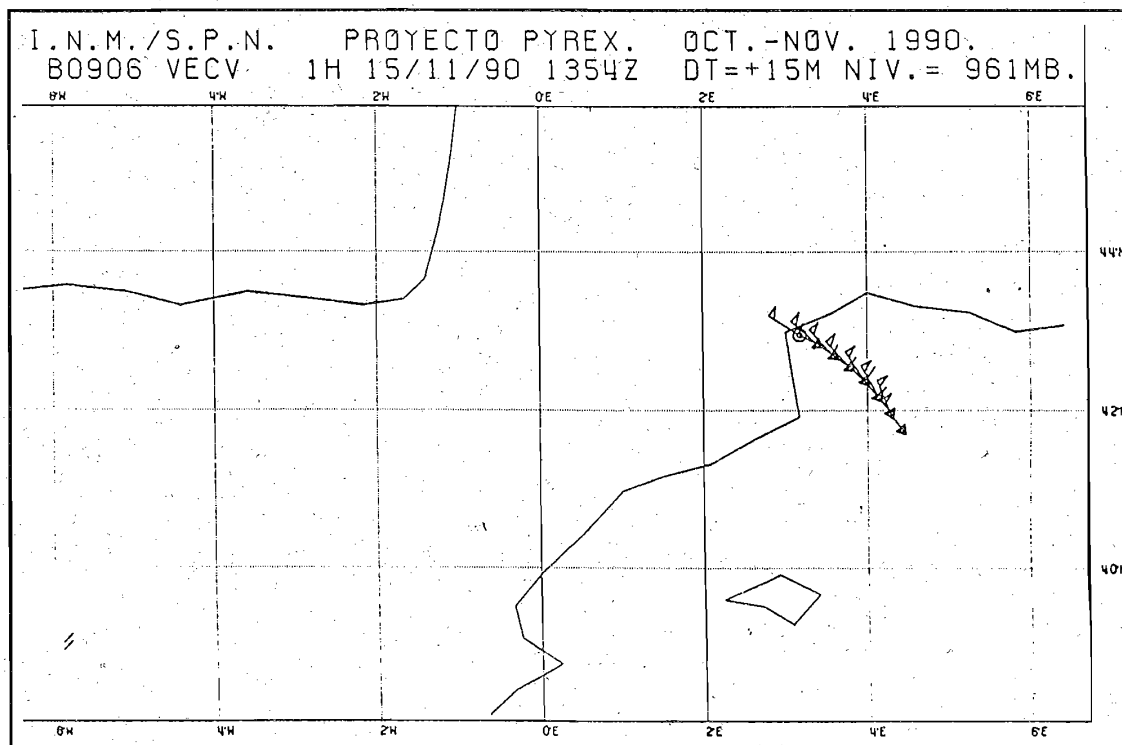


Figura 6.- Trayectoria del globo B906 de nivel constante lanzado el 15/11/90 a las 13,54Z y valores de viento cada 15 minutos calculados a partir de su desplazamiento

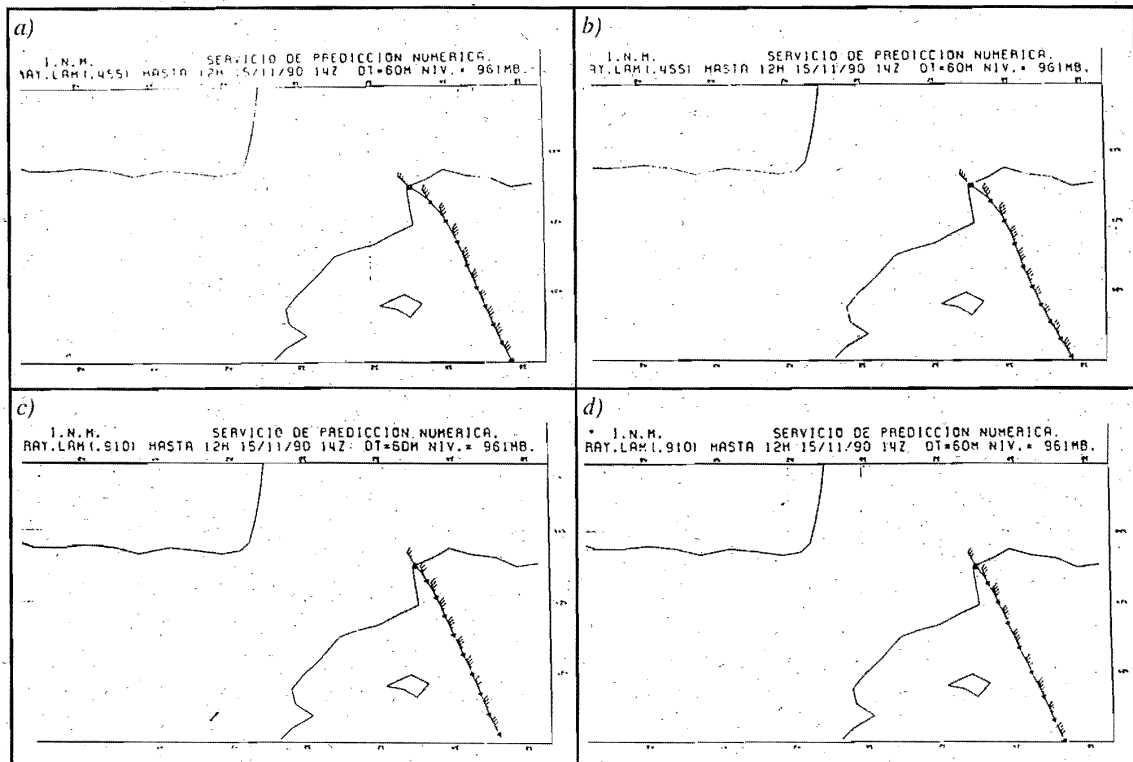


Figura 7.- Trayectorias previstas en el nivel de vuelo del globo B906, a) con el LAM0.455 en la integración iniciada el día 14 a las 12 UTC, b) igual para la integración iniciada el día 15 a las 00 UTC, c) igual que a) para el LAM0.910 y d) igual que b) para el LAM0.910

mistral y tramontana) y un efecto mayor de la orografía sobre el flujo.

- Las estructuras a sotavento de los Pirineos necesitan mayor resolución horizontal para estar mejor representadas, por lo que es aquí donde se nota la mayor mejora al pasar del LAM0.455 al LAM0.166. En particular, la depresión de sotavento de Gerona, la línea de cizalladura de la tramontana y los detalles de la circulación del viento en el Valle del Ebro.

- Parece demostrarse la **utilidad de la versión en modo adaptación** que, simplificada, podría usarse como parte del post-proceso de los campos previstos por el LAM y ejecutarse localmente en los G.P.V. que lo necesiten.

- Finalmente, podemos afirmar, a la vista de todos estos resultados, que es necesario que se acometa, por parte del INM, la adquisición y puesta en marcha de un nuevo ordenador cuya potencia de cálculo permita aumentar las resoluciones, tanto horizontal como vertical, del LAM, como primera medida para mejorar los resultados de dicho modelo.

Referencias.

- Bougeault, P.; Jansá, A.; Benech, B.; Carissimo, B.; Pelou, J.; Richard, E. (1990). Momentum budget over the Pyrénées: The PYREX experiment. *Bull. Am. Met. Soc.*, 71, 806-818.
- Buzzi, A.; Tibaldi, S. (1977). Inertial and frictional effects on rotating stratified flow over topography. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 103, 135-150.
- Egger, J. (1972). Numerical experiments on the cyclogenesis in the Gulf of Genoa. *Bietr. Phys. Atmos.*, 45, 320-346.
- Egger, J. (1974). Numerical experiments on lee cyclogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, 102, 847-860.
- Genovés, A.; Jansá, A. (1989). Statistical approach to mesoscale non-alpine West Mediterranean cyclogenesis. *WMO TD no. 298*, 77-85.
- Jansá, A. (1975). Inestabilidad baroclina y ciclogénesis en el Mediterráneo Occidental. Tesis doctoral. Publicada por el INM en 1988, núm. A-133, 80 pp.
- Jansá, A. (1987). Distribution of the mistral: a satellite observation. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 36, 201-214.

- Klein, W.H. (1957). *Principal tracks and mean frequencies of cyclones and anticyclones in the Northern Hemisphere. Research Paper no. 40, U.S. Weather Bureau. Washington, D.C.*
- Newton, C.W. (1956). *Mechanisms of circulation change during a lee cyclogenesis. J. Meteorol., 13, 528-539.*
- Pettersen, S. (1956). *Weather analysis and forecasting. (2nd ed., vol. I). McGraw-Hill. New York.*
- Radinovic, D. (1965, a). *On forecasting in the West Mediterranean and other areas bounded by mountain ranges by baroclinic model. Arch. Meteorol. Geophys. Biokl. (A), 14, 279-299.*
- Radinovic, D. (1965, b). *Cyclonic activities in Yugoslavia and surrounding areas. Arch. Meteorol. Geophys. Biokl. (A), 14, 391-408.*
- Reitan, C.H. (1974). *Frequencies of cyclones and anticyclones for North America. 1951-1970. Mon. Wea. Rev., 102, 861-868.*
- Reiter, E.R. (1975). *Handbook for forecasters in the Mediterranean. Environmental prediction research facility. Monterrey. California. Technical Paper no. 5, 75 pp.*
- Riosalido, R.; Vázquez, L.; Gordo, A.; Jansá, A. (1985). *Cierzo northwesterly wind along the Ebro Valley as a mesoscale effect induced on the lee of the Pyrénées mountain range. A case study during ALPEX-SOP. ALPEX preliminary scientific results. WMO. GARP-ALPEX, no. 7, 565-575.*
- Speranza, A. (1975). *The formation of baric depressions near the Alps. Ann. Geofis. Rome, 28, 177-217.*